

(申报 2018 国家级虚拟仿真实验项目)

先进压水堆核电厂运行及典型事故仿真实验

Virtual Reality for Operation and Typical Accidents of

Advanced Pressurized Water Reactor

实验指导书

(在线实验版)

Experiment Manual (online)

简介

先进压水堆是当前我国核电技术发展应用的主流。本实验基于工业级的全范围多功能核电厂压水堆模拟机开发。实验内容为正常运行工况下触发的典型事故（冷段破口失水事故、蒸汽发生器传热管断裂事故、控制棒弹棒事故等）的演化瞬态过程及干预操作，也包含反应堆原理演示等。实验形式生动，支持远程运行。

实验分步指导

请在项目主页面点击“我要做试验”，或直接输入虚拟仿真实验项目网址：<http://nydl.hust.owvlab.net/virexp/hdc>，该页面包含了相关的实验资料，并可下载本实验指导书。点击“操作实验”进入在线实验页面。

注意，本实验支持 IE 内核的浏览器(如果是 Windows 10 内置 Microsoft Edge 浏览器，打开后请点击菜单栏右上角的省略号“...”，在下拉菜单中选择“使用 Internet Explorer 打开”)，推荐使用 360 极速浏览器。进入实验页面后，请按提示下载安装插件 (UnityWebPlayer)。

插件下载完毕后，显示如下界面，进行在线实验的装载。



装载完毕后，显示实验开始界面。



点击开始后，进入在线实验界面。分为实验预备和正式实验两个环节。

实验预备：基础知识与实验原理回顾

在实验预备环节，可以选择如下动态观察和交互式操作，进行基础知识与实验原理的温习回顾，为正式实验做准备。

(1) 基于核反应堆基本原理展示系统，观看压水堆部件结构动画演示；

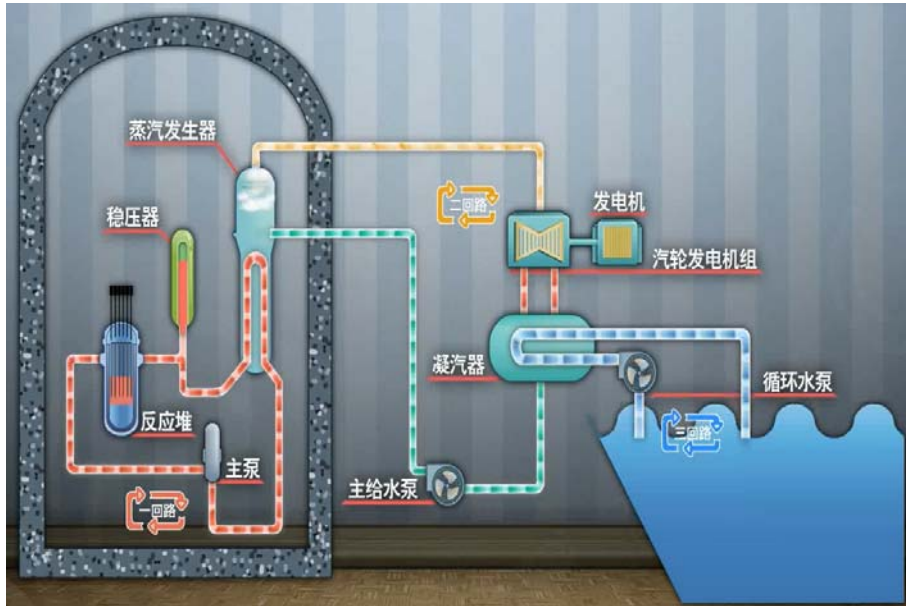


图 核电站原理展示系统

(2) 在核电站运行原理模拟机上，通过按钮进行交互式模拟核电站的各种操作，包括启动、升功率、降功率、喷淋、停堆等关键操作。

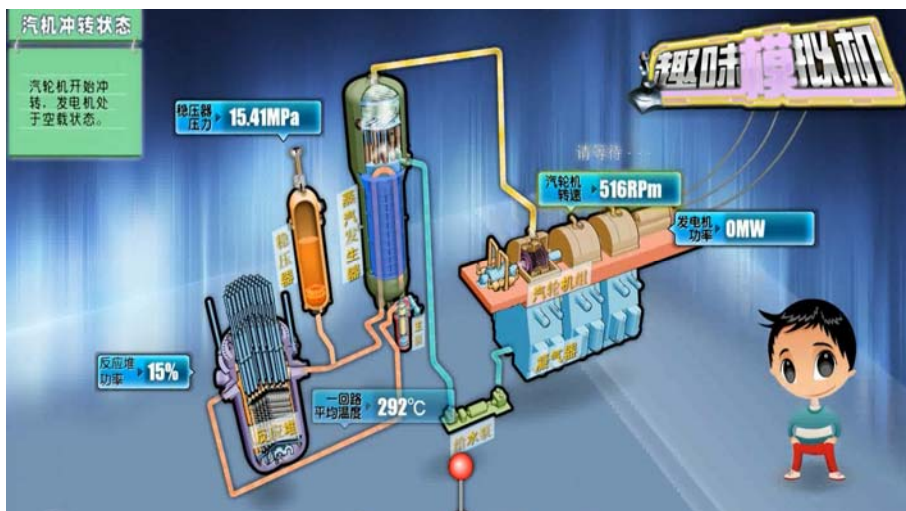


图 核电站运行原理模拟机界面

正式实验：核电厂运行及典型事故虚拟仿真

I. 核电厂正常运行

点击正式实验进入后，实验可分为如下步骤进行：

(步骤1) 本实验模拟的典型事故在核电厂满功率正常运行的条件下发生。

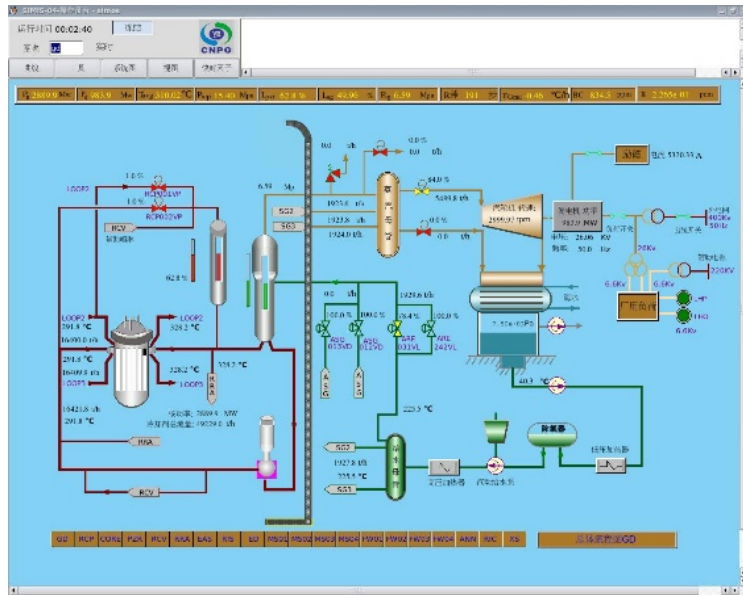
因此首先的步骤是实现核电厂的正常运行。首先，按提示点击“复位”按钮。从“初始条件”中选择一个第一个运行工况，并点击左侧菜单上的“运行”启动实验。注意，随时可以在点击右侧菜单的“切换界面”和“返回”进行界面切换和返回主界面。实验的操作提示位于窗口上方。



工况	名称	启动时间	电功率(MW)	热功率(MW)	RCP流量(M ³ /h)	RCP平均温度(°C)	反应堆功率(MW)	堆芯出口温度(°C)	堆芯入口温度(°C)	堆芯出口压力(MPa)	堆芯入口压力(MPa)	备注
复位	IR01 *	2009.08.11 09:30	0.0	2000.1	15.4	210.0	99.2	BOIL	634.2	191		
启动	IR02 *	2009.08.11 17:14	250.3	1181.8	15.1	207.9	105.6	BOIL	627.0	196		350MW
	IR03 *	2009.08.07 09:50	0.0	57.3	15.4	202.0	99.0	BOIL	642.8	188		热备用
	IR04 *	2009.08.07 09:50	0.0	12.9	15.4	201.3	91.1	BOIL	610.7	186		跟踪设备
故障	IR05 *	2009.08.07 09:51	0.0	32.2	15.4	202.5	134.0	BOIL	1200.0	5		热停堆
	IR06 *	2009.08.07 09:51	0.0	19.7	2.5	179.9	193.2	BOIL	1952.5	225		余热投入堆
	IR07 *	2009.08.07 09:52	0.0	18.3	2.5	145.8	194.4	BOIL	2085.8	225		无汽阻
停堆	IR08 *	2009.08.07 09:55	0.0	16.7	2.5	83.1	188.9	BOIL	2085.6	225		正常停堆
	IR09 *	2009.08.07 09:55	0.0	16.1	2.6	132.4	184.0	BOIL	1300.0	225		无汽阻
	IR10 *	2009.08.07 09:57	0.0	440.7	15.4	205.2	85.4	BOIL	674.3	188		停堆堆

图 正常运行初始条件

(步骤2) 正常运行开始后，通过点击“切换界面”来到操作员主菜单界面，点击“系统图”-“总体流程图”，分别点击 RCP、CORE，观察总体流程图、主冷却剂系统(RCP)图、反应堆堆芯(CORE)系统图中的冷却剂温度、流量等参数值以及阀门开闭状态、控制棒位置等。



图反应堆主冷却剂系统图

(步骤3) 点击“曲线”-“监视参数曲线”，可以观察正常运行下的稳态曲线图。查看参数的稳定性。核实堆芯热功率、稳压器压力等参数符合设计值。这里可以按提示进行截图保存曲线图。

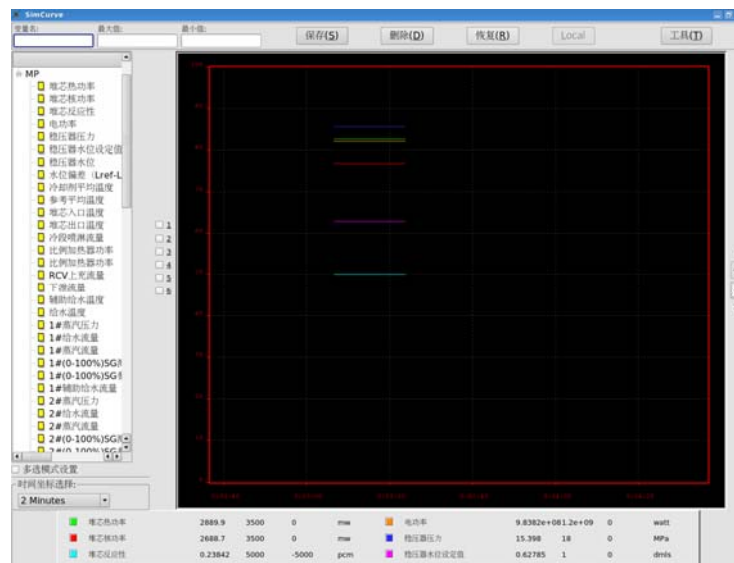


图 正常运行下的核心参数稳定状态

(步骤4) 验证正常运行工况合格以后，点击“切换界面”，和“返回”。在主界面选择一个事故，例如“环路一冷段破口”。这里可选取三个典型事故（每项事故中均可设置破口大小等相应参数）。



图 从故障列表引入不同的事故工况

II. 环路一冷段破口事故

(步骤5) 选择第一个“环路一冷段破口事故”，点击输入相对破口尺寸(0-1)，设定延迟触发时间(可选)，点击确定后触发事故。

⊙实验提示：破口尺寸的大小将影响主回路系统内冷却剂向外喷放流失的速率，进而影响事故后果的严重程度。破口越大，冷却剂向外喷放流失的速率越大，系统压力下降越快，导致堆芯液位下降越快，流体更容易发生闪蒸相变，引起堆芯传热恶化，甚至可能发生堆芯裸露烧毁。



图 设定典型事故参数

(步骤6) 触发事故后,依次从以下界面观察事故发生后的相关事件序列与参数图:总体流程图、主冷却剂系统图、堆芯以及重要设备状态显示图。



图 事故工况下堆芯系统图

(步骤7) 进行适当的交互式事故干预,例如:在稳压器压力控制面板中进行相应的事故处理操作。对与稳压器相连的 RCP401RC 压力控制器的

开度进行手动调节，以控制稳压器顶部的喷淋流量大小，从而调节降压速率。观察事故干预前后压降曲线的变化趋势。

⊙ **实验提示：** 这里干预措施的原理是：当发生破口失水事故后，由于在破口处的喷放卸压，导致主回路系统压力迅速下降。而主回路系统的压力主要通过稳压器来调控。通过引入对稳压器顶部喷淋流量调节的干预措施，可以调节并维持稳压器内的水位，进而可调节主回路系统降压的速率，从而可以在一定程度上缓解破口失水事故的后果。

通过干预前后关键参数的曲线图对比，我们可以看到：采取对稳压器的干预措施之后，稳压器水位增加，稳压器压力的下降速率相比干预前更加缓慢，冷却剂平均温度及堆芯温度的下降速率也相应地变缓慢。

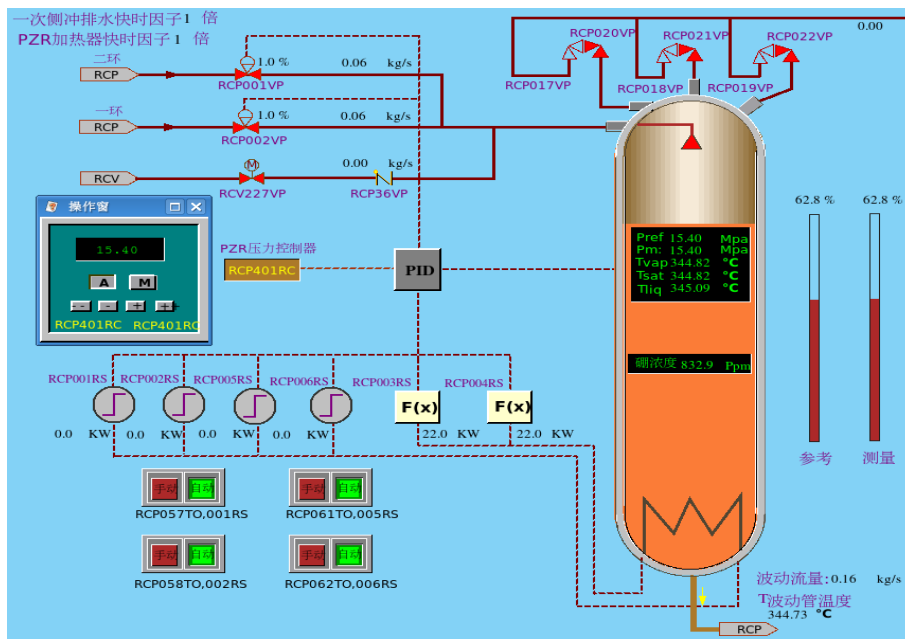


图 在稳压器压力控制面板进行交互式干预

(步骤8) 进入报警事件序列界面，观察记录事件触发时间，记录停堆时间。

localhost.localdomain-教练员台			
>>		2018.09.28 17:00:08	
实时运行 00:00:15		仿真状态	
		故障 1:1	就地 0:0
		事件 16	
报警事件列表			
冻结	事件序号	事件触发时间	事件描述
复位	1	0:00:00	稳压器压力低
	2	0:00:00	稳压器压力补偿值低
	3	0:00:01	环路DELTA-T偏差高
初态	4	0:00:02	稳压器水位低于设定值
	5	0:00:04	P11允许信号
	6	0:00:07	停堆
故障	7	0:00:07	功率量程变化率高
	8	0:00:07	操作带低位
	9	0:00:07	环路平均温度偏差高
就地	10	0:00:08	AVG MAX/TEM REF温度偏差
	11	0:00:08	R棒LO-LO-LO行程限值
	12	0:00:08	汽机脱扣
仿真图	13	0:00:09	主给水隔离
	14	0:00:09	安注启动
	15	0:00:09	蒸汽管线流量高或压力低
快照	16	0:00:10	蒸汽发生器水位异常

图 报警事件序列

(步骤9) 通过菜单提示进入参数监视动态曲线图界面，观察相应重要参数曲线显示图（每个事故重要参数略有不同）。如堆芯热功率、堆芯核功率、一回路系统压力、堆芯冷却剂平均温度、主泵流量、稳压器水位、蒸汽发生器水位、控制棒位置等。

⊙ **实验提示：**事故描述：当冷段破口出现后，主回路系统的冷却剂从破口向外喷放，主回路系统的压力因冷却剂的流失而降低。当系统压力降压到一定程度，稳压器低压信号触发反应堆紧急停堆，二回路汽轮机停机；随着压力的降低，根据系统压力低信号启动高压安注泵，高压安注系统投入运行，向堆芯注入含硼冷却水；系统压力进一步降低，为保护主泵，需关闭主泵；当系统压力继续下降到安注箱启动的压力，安全注射箱自动开始注水；系统压力继续下降，低压安注系统开始投入运行，进入堆芯低压长期冷却阶段。

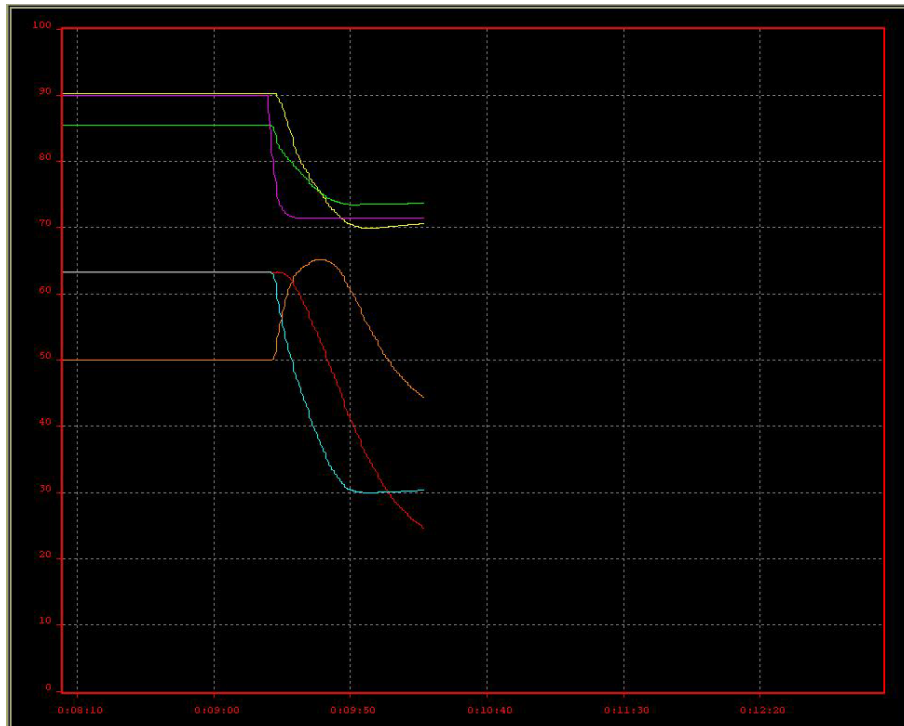


图 事故工况下重要监视参数趋势图

- (步骤10) 通过打印功能，绘制事故进程中的重要参数趋势图并保存。
- (步骤11) 分析事故进程，安全系统在事故后的功能，并做出核电厂运行状态是否安全的评估。
- (步骤12) 当事故瞬态进程稳定以后，点击“复位”按钮以结束事故，从而结束仿真实验。

III. 蒸汽发生器传热管破裂事故

- (步骤13) 第二个典型事故为蒸汽发生器传热管破裂。重复正常运行，从故障列表中引入相应的事故触发条件，设定典型事故参数(可选尺寸0-1)。



图 设定典型事故参数

(步骤14) 事故发生后进行交互式干预，例如，通过手动调节蒸汽发生器底部所连的 ASG 排污阀的开度，控制蒸汽发生器的水位。观察比较蒸汽发生器的实际水位与参考水位的变化。

⊙ **实验提示：**这里干预措施的原理是：当发生蒸汽发生器传热管破裂事故时，一次侧带有放射性的水将会通过蒸汽发生器传热管泄漏到二次侧，引起蒸汽发生器的水位持续上升。通过引入对蒸汽发生器底部排污阀开度控制的干预措施，可以将泄漏到二次侧的水进行适当排放，从而可以控制蒸汽发生器的水位，而不至引起蒸汽发生器满溢的严重后果。

干预后我们将观察到：蒸汽发生器由于传热管破裂导致的水位增加的速率得到缓解，随着底部 ASG 排污阀开度的调大，蒸汽发生器内的水通过底部排放出去，从而能更好地调节蒸汽发生器的水位，使其实际水位不至过多偏离参考水位。

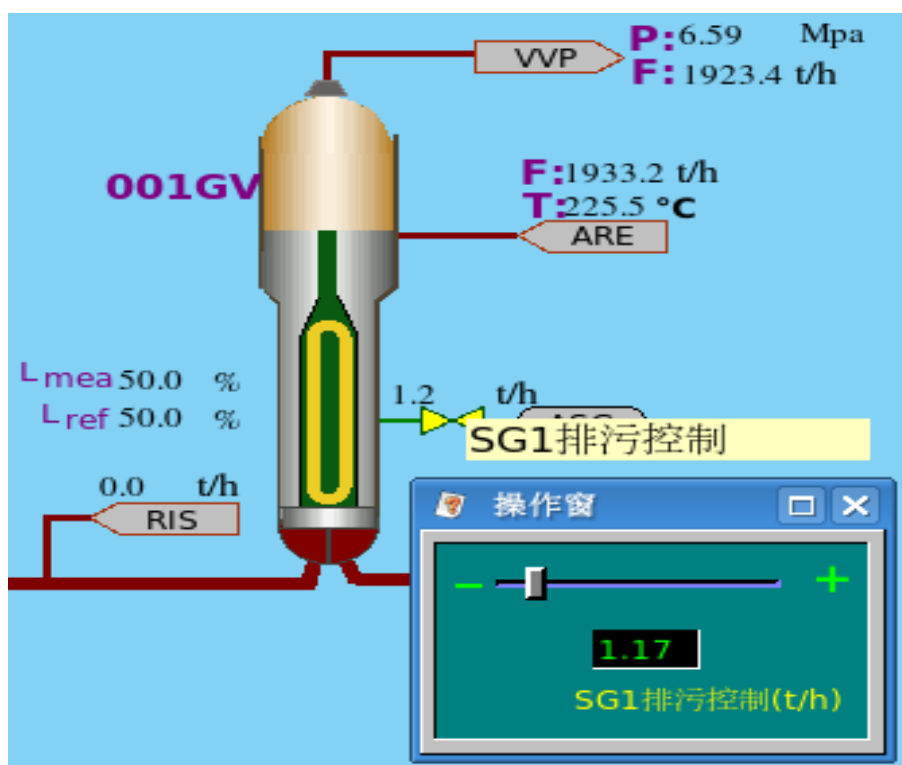


图 蒸汽发生器排污阀流量调节

④ **实验提示：**事故描述：当蒸汽发生器传热管破裂事故发生后，一回路的情况是：破口造成一回路水向二回路流失，一回路系统压力下降；当降到稳压器低压停堆阈值时，反应堆紧急停堆，汽轮机脱扣；当一回路压力低到安注阈值时，安注系统投入，化容系统正常上充隔离，由安注系统补偿一回路水的流失；高压安注泵的流量一旦大于破口流量，一回路压力回升，并稳定在某一值上。然后，启动辅助给水，压力缓慢减小。二回路的情况是：事故后，一回路的水进入二次侧，造成二回路污染。出故障蒸汽发生器的水位上升；故障蒸汽发生器给水流量减小而呈现汽水流量失配；同时，故障蒸汽发生器产生蒸汽流量增加使其他蒸发器流量减小。

IV. 控制棒控制系统弹棒事故

(步骤15) 第三个典型事故为控制棒控制系统弹棒事故。重复正常运行，从故障列表中引入相应的事故触发条件，启动该事故。

(步骤16) 事故发生后进行干预操作，例如：将停堆方式由“自动”切换为“手动”模式，直接进行手动停堆，可以看到控制棒迅速向下插入堆芯。观察手动停堆后参数曲线的变化趋势。

⊙实验提示：这里干预措施的原理是：控制棒控制系统弹棒事故是由于控制棒驱动机构密封罩壳的破裂，使得全部压差作用到控制棒驱动轴上，从而引起控制棒迅速弹出堆芯的事故。发生弹棒事故后，控制棒不能自动下插入堆芯进行停堆，必须通过手动停堆来控制堆芯反应性的意外引入，防止核功率的激增。

干预后我们将观察到：通过手动方式进行停堆，可以使得控制棒迅速向下插入堆芯，从而使得堆芯能够及时停堆。由于弹棒事故引起的堆芯核功率的激增得到缓解，堆芯引入的过大反应性得到控制。

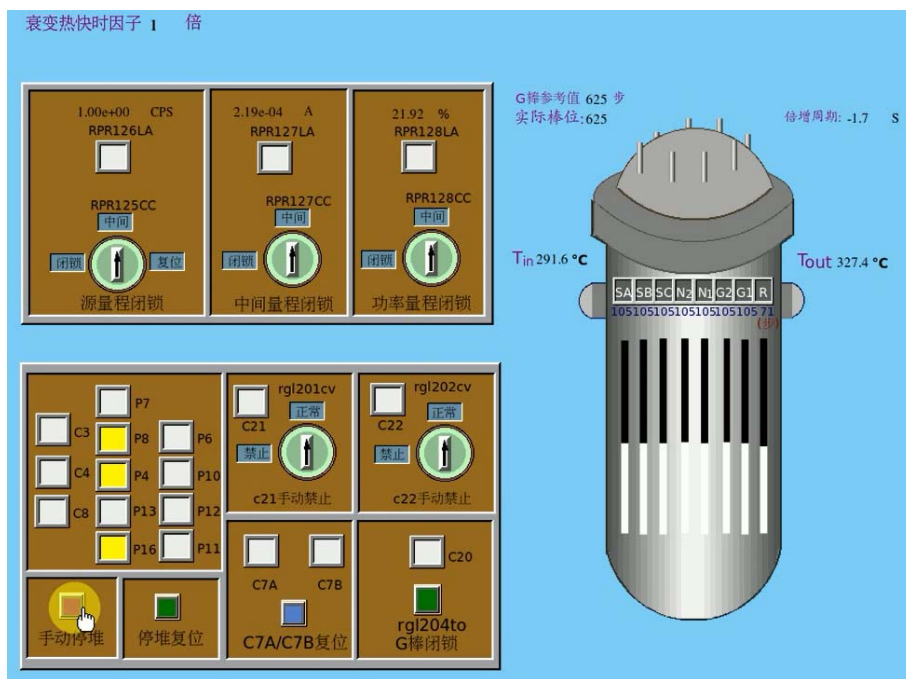


图 手动插入控制棒停堆

⊙ **实验提示：**事故描述：控制棒弹棒事故发生后的主要过程是，开始的短时间内，功率激增产生的大部分能量储存在 UO2 芯块内部，将使最热的芯块熔化，释放出的气体在燃料棒内部形成高压，使燃料棒瞬时破裂。当热量传递到元件包壳，可造成部分包壳发生偏离泡核沸腾 (DNB)，可能影响堆芯完整性。当热量传递到冷却剂，冷却剂系统温度和压力升高，形成一回路压力高峰。弹棒事故的主要特征是功率脉冲，其关心的主要问题是燃料破损问题。

(步骤17) 待事故进程稳定后，可以记录重要参数的相关数据，打印曲线图，点击“复位”，退出系统，结束实验。

(步骤18) 运行结束后，对三起事故分别与正常运行状况进行对比，分析重要参数曲线趋势变化的原因，干预操作所起到的作用与效果，不同事故参数带来的瞬态过程差异，并从总体安全性上对三起事故引起的后果等进行边分析，形成实验报告。

⊙ **实验提示：**本实验展示了核电站在发生典型事故时，反应堆系统会经历停堆、安注触发、阀门关闭等一系列的事故瞬态过程，而相关的物理参数如功率、压力、流量等也会形成瞬态曲线。核电站所配备的安全系统能够进行相应的自动响应来减轻或消除事故后果。而通过操作员进行适当的干预，也可以将事故进程引导向更加安全的状态，从而缓解堆芯温度和压力升高的程度，保障核电厂的安全性。